

# Synergie entre le mésocentre grenoblois CIMENT et la grille européenne EGI pour la recherche de nouvelles particules dans l'expérience ATLAS auprès du collisionneur LHC au CERN

Catherine Biscarat(1), Quentin Buat(2), Jan Stark(3)

(1) [biscarat@lpsc.in2p3.fr](mailto:biscarat@lpsc.in2p3.fr), LPSC, CNRS-IN2P3, UJF, INP

(2) [quentin.buat@lpsc.in2p3.fr](mailto:quentin.buat@lpsc.in2p3.fr), LPSC, CNRS-IN2P3, UJF, INP

(3) [jan.stark@lpsc.in2p3.fr](mailto:jan.stark@lpsc.in2p3.fr), LPSC, CNRS-IN2P3, UJF, INP

## Overview:

We describe the synergy between the production grids of CIMENT (a multidisciplinary mesocentre in Grenoble) and WLCG (the LHC computing grid) for the analysis of data recorded by the ATLAS experiment at the LHC collider. The LHC collider at CERN (Geneva, Switzerland) is the leading facility for research at the high energy frontier. The main goal of this facility are the search for a subatomic particle called the Higgs boson and the search for any hints of new phenomena beyond the Standard Model of particle physics. The observation of the Higgs boson has been announced earlier this month by ATLAS and CMS, the two general-purpose experiments operating at the LHC. Researchers at LPSC in Grenoble are leading the search for one particular type of new phenomena in the ATLAS experiment, namely the search for additional spatial dimensions which would manifest themselves via the production of a particle called graviton in LHC collisions. Given the rich multitude of physics studies proceeding in parallel in the ATLAS collaboration, one of the limiting factors in the timely analysis of ATLAS data is the availability of computing resources. This limitation becomes problematic in the months that precede the international conferences where major results are released. The sharing of resources between different scientific fields, like the one discussed in this article, constitutes a valuable synergy, because the spikes in need for computing resources are uncorrelated in time between different fields. The result of our collaboration between fields manifest themselves in the timely publication of the LHC results that are eagerly awaited both by the particle physics community and by the general public.

## Enjeux scientifiques, besoin en calcul, stockage et visualisation :

Ces quatre dernières décennies, les physiciens des particules ont établi le Modèle Standard de la physique des particules (MS) qui décrit l'ensemble des particules élémentaires constituant la matière et leurs interactions. Ce modèle incorpore trois des quatre interactions fondamentales connues : électromagnétisme, interaction faible et interaction forte. La gravitation n'est pas incluse car nous n'avons pas trouvé la clef pour décrire ensemble, dans une théorie cohérente, les aspects quantiques qui concernent les constituants élémentaires de la matière et la relativité générale qui concerne la gravitation. Depuis son élaboration, le MS n'a jamais été mis en défaut par les expériences. Ses prédictions ont été vérifiées par les observations expérimentales avec une extrême précision et il a aussi prédit l'existence, aujourd'hui avérée, de plusieurs particules telles que le boson de Higgs dont la découverte a été annoncée très récemment (le 4 juillet 2012) par ATLAS et CMS, les expériences généralistes installées auprès du collisionneur le plus énergétique du monde, le LHC (*Large Hadron Collider*) à Genève en Suisse. Malgré son pouvoir prédictif, le MS souffre d'insuffisances et d'aspects *ad hoc* non naturels (comme la nécessité d'ajuster finement la valeur de certains paramètres du modèle). Ceci matérialise notre manque de compréhension détaillée de la nature de ces interactions à des énergies élevées, dont le MS décrirait le cas limite aux énergies relativement basses que nous avons explorées jusqu'à présent. Plusieurs théories plus fondamentales et plus complètes, supposant l'existence de nouvelles particules ou de nouvelles symétries, ont été proposées pour résoudre ces problèmes. Le LHC est l'instrument qui a été construit principalement pour mettre en évidence le boson de Higgs. Le deuxième pan de son programme de physique est la production de nouveaux phénomènes dont l'observation étayerait l'une ou l'autre de ces théories.

L'analyse des données des expériences LHC, et en l'occurrence de ATLAS, nécessite une grande puissance de calcul. En effet jusqu'en 2011 une luminosité intégrée de  $4,9 \text{ fb}^{-1}$  a été accumulée par ATLAS, correspondant à 1,6 milliards d'événements, soit 1,0 PB de données brutes (à la sortie du détecteur). Les événements bruts sont tout d'abord « reconstruits » pour dégager les objets physiques créés dans la collision (les particules élémentaires) à partir des informations données par les canaux de lecture du détecteur ATLAS. Les objets reconstruits sont alors analysés et comparés à des simulations pour chercher des déviations du jeu de données de ATLAS par rapport à un modèle donné. Cette dernière étape, appelée « analyse finale », est opérée par un grand nombre de physiciens qui sont organisés en groupes de quelques personnes travaillant indépendamment les uns des autres.

Pour assurer la grande puissance de calcul demandée par les expériences LHC (sans parler du stockage ici), la communauté LHC s'est organisée afin de fournir une grille de production fiable et puissante. Celle-ci est appelée WLCG. Elle s'appuie sur la grille européenne EGI (*European Grid Initiative*) qui regroupe environ 150 sites dans le monde entier et dont le LPSC (Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie) de Grenoble est un nœud de niveau secondaire : il accueille les simulations du détecteur et les analyses finales des physiciens.

Les sites WLCG ont eu un grand succès dans la préparation des données (reconstruction et simulation) pour les analyses

finales présentées aux dernières conférences, et notamment pour la recherche du boson de Higgs dont l'observation a été annoncée il y a quelques jours à l'une des conférences les plus réputées de notre domaine, ICHEP (*International Conference on High Energy Physics*). Toutefois, toutes les analyses sont en compétition pour obtenir de la puissance de calcul en période de conférence.

La grille de production CIMENT [1] soutient des thématiques de recherche différentes de la physique des particules et n'observe pas des pics d'utilisation corrélés. Ainsi, l'utilisation de la grille de production CIMENT pour les analyses finales de physiciens des particules du LPSC constitue une véritable synergie entre le site de productions LPSC de EGI et de la grille de production de CIMENT dont la collaboration a débuté en 2010 [2].

### **Développements, utilisation des infrastructures :**

Les infrastructures de CIMENT et de WLCG sont différentes et disjointes :

- le stockage : iRODS pour CIMENT et DPM pour WLCG au LPSC;
- l'intergiciel : cigri pour CIMENT et glite pour WLCG.

Ces différences constituent une difficulté pour passer d'une grille à l'autre. De plus, dans les sites LCG, toutes les applications et les paquets utilisés par les expériences sont installés automatiquement (de façon globale) alors que les nœuds de CIMENT sont « nus » en ce qui concerne les applications de physique des particules. Le portage des applications en est bien-sûr complexifié.

Nous avons dû écrire des programmes spécifiques pour permettre le déploiement automatique et l'exécution des applications de physique des particules sur des machines nues. Concrètement nous utilisons ces programmes pour exécuter et chaîner des applications telles que :

- ROOT [3] : la boîte à outil standard pour l'analyse des données scientifiques en physique des particules abondamment utilisée dans notre discipline ;
- LHAPDF [4] : la bibliothèque standard de description de la structure du proton et d'autres projectiles communément utilisés en physique des particules ;
- DIPHOX [5] : générateur précis d'état final en une paire de photons ;

sur CIMENT.

Aussi, une spécificité des études de physique avec l'outil DIPHOX est la quantification des incertitudes systématiques. Cela consiste à exécuter de nombreuses fois DIPHOX en faisant varier des valeurs des paramètres théoriques. Ainsi nous avons conçu et écrit des applications pour encapsuler ces différentes exécutions.

### **Outils, le cas échéant complémentarité des ressources, difficultés rencontrées :**

La physique des particules est une discipline qui foisonne d'activités et de résultats dont chaque brique doit être confrontée aux autres pour offrir un panorama complet des constituants élémentaires de la matière et de leurs interactions. Plus précisément, les résultats d'expériences indépendantes auprès de collisionneurs complémentaires (en terme d'énergie ou bien de nature des faisceaux) doivent être combinés pour en extraire des conclusions sur les lois fondamentales de la nature. En effet, le programme de physique du LHC est en lui-même extrêmement riche mais il existe aussi plusieurs autres collisionneurs qui ont fourni des résultats qui sont nécessaires pour interpréter les données du LHC. Citons par exemple les résultats des collisionneurs HERA à Hambourg en Allemagne et Tevatron à Chicago aux Etats-Unis sur la structure du proton. En effet les protons sont les projectiles utilisés dans le collisionneur LHC et la connaissance de leur structure est un pré-requis pour interpréter les données du LHC. Ou citons encore les résultats sur la masse du quark top et celle du boson W obtenus au Tevatron qui nous permettent de mettre à jour la nature du boson découvert récemment au LHC.

Ainsi, chaque année, la communauté de physique des particules organise deux grandes conférences internationales pendant lesquelles les résultats récents sont présentés à la communauté et confrontés aux résultats obtenus par ailleurs. Ces grandes séries de conférence sont : « Les rencontres de Moriond » qui ont lieu chaque hiver, et « ICHEP » (*International Conference on High Energy Physics*) et « Lepton-Photon » qui se déroulent un été sur deux en alternance. Ces rendez-vous rythment la vie des expériences et la publication des résultats. Ils sont très importants, notamment pour les étudiants de doctorat qui peuvent alors mettre en valeur le produit de leur recherche.

Chaque expérience LHC participe à ces conférences et présente les analyses faites sur la plus grande quantité possible de données, c'est-à-dire en incluant les données les plus récentes. De ce fait, les ressources de calcul sont particulièrement sollicitées les mois qui précèdent ces conférences. Or, les sites WLCG sont les mêmes pour toutes les expériences et aussi pour les activités de production (comme celles de simulation) et les activités d'analyse, rendant aux utilisateurs l'accès aux ressources plus délicates dans ces périodes.

La consolidation du site du LPSC avec la grille CIMENT nous permet naturellement de contourner ce phénomène de « bouchon » aux périodes de conférences car les disciplines qui historiquement sont supportées par CIMENT sont dissociées en temps des grands rendez-vous de la physique des particules. Les analyses menées au LPSC sur la recherche de RS gravitons dans ATLAS ont ainsi bénéficié de la disponibilité et la grande réactivité de la grille CIMENT.

### Résultats scientifiques :

Comme nous l'avons mentionné plus haut, un des buts majeurs en physique des particules ces dernières décennies a été d'explorer des extensions du MS afin de comprendre les aspects *ad hoc*s et non naturels de cette théorie. Les théories au-delà du MS postulent pour la plupart l'existence de nouvelles particules, de nouvelles dimensions spatiales ou bien de nouvelles symétries. Dans le modèle de Randall-Sundrum (RS) [6] qui nous intéresse ici, une géométrie spatiale avec une dimension supplémentaire est supposée, la cinquième dimension étant compactifiée avec la longueur  $r_c$ . Une des manifestations de cette théorie serait l'existence de gravitons excités qui pourraient être produits au LHC. La théorie peut être décrite avec deux paramètres : la masse du graviton le plus léger ( $m_G$ ) et le couplage aux champs du MS ( $k/\bar{M}_{Pl}$ ) où  $\bar{M}_{Pl}$  est directement proportionnelle à l'échelle de Planck  $M_{Pl}$ .

Au LPSC, les physiciens sont *leaders* dans la recherche de gravitons dans le canal di-photon :  $G \rightarrow \gamma\gamma$ . Ce canal est particulièrement intéressant car il représente une signature expérimentale très claire dans un collisionneur hadronique comme le LHC. Aussi, il offre une excellente résolution en masse et comporte peu de bruit de fond physique tout en comptant un taux d'embranchement relativement grand (deux fois supérieur aux autres canaux de désintégrations individuels en lepton chargés  $G \rightarrow ll$ ).

Des simulations Monte Carlo sont utilisées pour interpréter les données. Le générateur d'événements de paire de photons DIPHOX est utilisé afin de corriger le spectre en masse diphoton des événements complets générés avec le générateur d'événements standard PYTHIA [7]. Cette méthode permet de prendre en compte des effets fins tels que des corrections à l'ordre supérieur dans les graphes de production de paires de photon et des processus de fragmentation.

Pour cette analyse, l'ensemble des données de ATLAS collectées jusqu'en 2011 sont exploitées. La figure 1 montre que les données et les prédictions du MS sont en bon accord sur toute la plage de masse observée. En l'absence de signal, des limites sur la production de gravitons dans le modèle RS sont déterminées. Elles sont présentées sur la figure 1.

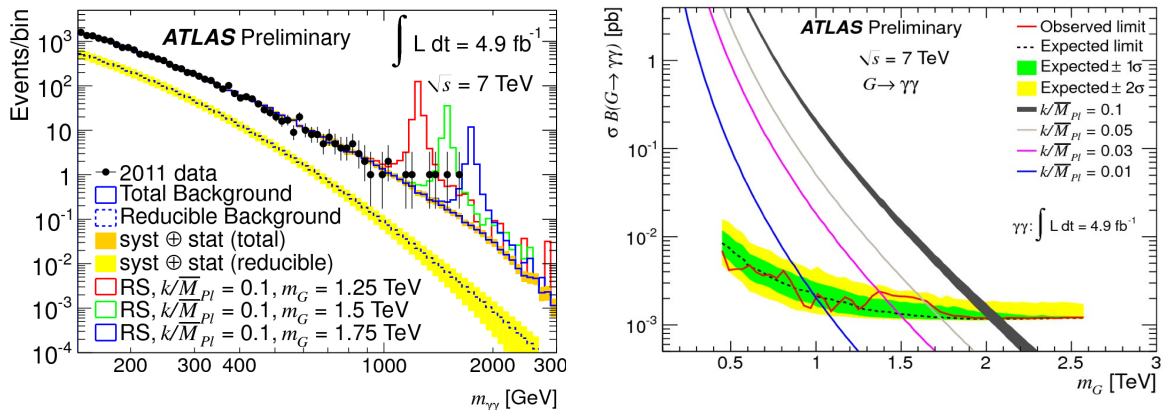


Fig. 1 : Gauche : Masse invariante de la paire de photon observée, avec la prédiction des contributions du MS et, superposés, les signaux RS qui seraient attendus pour divers modèles. Droite : Limites observée et attendue à 95% de degré de confiance sur la section efficace de production de gravitons dans le modèle de RS se désintégrant en une paire de photons (courbes les plus horizontales) en fonction de la masse du graviton ; et sections efficaces de production théoriques pour différentes valeurs du paramètre de la théorie  $k/\bar{M}_{Pl}$  (courbes obliques).

Ces résultats ont été montrés par la Collaboration ATLAS pour la première fois à la conférence ICHEP de cette année en juillet 2012 [8]. Une publication du même résultat dans un journal réputé dans la discipline est en cours de finalisation.

### Perspectives :

Les résultats obtenus lors de ce premier portage d'applications de physique des hautes énergies (ROOT, DIPHOX, ...) sur CIMENT ont été essentiels pour le travail de nos équipes de recherche. Nous disposons maintenant de toute une architecture pour de futures études systématiques pour la recherche de dimensions spatiales supplémentaires dans l'expérience ATLAS. Celle-ci a été utilisée par nos équipes pour faire des vérifications dans l'analyse des données 2011.

Pour la version de l'analyse en cours d'élaboration qui comprend les données de ATLAS prises en 2012, les ressources de CIMENT sont utilisées de façon routinière et font partie intégrante des résultats officiels de la Collaboration ATLAS.

Fort de cette expérience avec DIPHOX, nous élargissons le spectre des calculs sur CIMENT en portant un autre maillon de la chaîne de cette analyse : l'interprétation statistique des données. Cette application est appelée BAT [9] et elle n'est actuellement pas disponible sur CIMENT.

La mutualisation des ressources de calcul entre différentes disciplines, scientifiques comme c'est le cas ici, constitue une véritable synergie car les différentes disciplines utilisent les ressources de façon dé-corélée en temps, absorbant ainsi mieux les pics d'utilisation. Le résultat direct de cette collaboration se manifeste par l'élaboration plus rapide des résultats du LHC tant attendus à la fois par la communauté de physique des particules et par le grand public.

## Références :

[1] <https://ciment.ujf-grenoble.fr>.

[2] C. Biscarat et B. Bzeznik, « Collaboration des grilles de production grenobloises CIMENT et LPSC - Développement, ouverture à de nouvelles communautés d'utilisateurs et impacts scientifiques », Rencontres Scientifiques France-Grilles, Lyon (2011) ; <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00653019/fr/>.

[3] <http://root.cern.ch>.

[4] M.R. Whalley, D. Bourilkov, R.C. Group, contributed to HERA and the LHC: A Workshop on the Implications of HERA and LHC Physics (Startup Meeting, CERN, 26-27 March 2004; Midterm Meeting, CERN, 11-13 October 2004), Hamburg, Germany, 21-24 Mar 2005 ; e-Print Archive: [hep-ph/0508110](http://hep-ph/0508110) ; <http://hepforge.cedar.ac.uk/lhapdf/>.

[5] T. Binoth, J.P. Guillet, E. Pilon et M. Werlen, « A full next-to-leading order study of direct photon pair production in hadronic collisions », Eur. Phys. J. **C16** (2000), 311-330 ; e-Print Archive : hep-ph/9911340.

[6] L. Randall et R. Sundrum, Phys. Rev. Lett. **83**, 3370 (1999).

[7] T. Sjöstrand *et al.*, Comput. Phys. Commun. **135**, 238 (2001).

[8] « Search for resonances in lepton pairs and photon pairs with the ATLAS detector », présenté par X. Anduaga Del Popolo le 7 juillet 2012 dans la session parallèle « BSM - Non-SUSY Exotics » de la conférence ICHEP, Melbourne, Australie.

[9] A. Caldwell, D. Kollar, K. Kröninger, « BAT – The bayesian analysis Toolkit », Computer Physics Communications **180** (2009) 2197-2209 ([ScienceDirect](http://www.sciencedirect.com)) [[arXiv:0808.2552](http://arxiv.org/abs/0808.2552)] ,<http://www.mppmu.mpg.de/bat/>.